文章编号:1000-4939(2023)05-1085-11

考虑耐张绝缘子串的八分裂输电线路舞动特性研究

刘竹丽[1],霍翔宇[1],伍川[2],王金洋[1],张博[2],刘光辉[2]

(1. 郑州大学机械与动力工程学院,450001 郑州;
2. 河南省电力线路舞动防治技术重点实验室,国网河南省电力公司电力科学研究院,450052 郑州)

摘 要:导线舞动是长期以来影响输电线路度冬安全的重要因素。以包含耐张绝缘子串的新月形覆冰八分裂输电线路为对象,FLUENT 及 ABAQUS 为平台,开展了导线的气动特性及驰振稳定性分析,研究了分裂导线的扭转刚度及动力特性,考察了不同绝缘子串连接形式、风速及初始风攻角对幅值、位移时程及运动轨迹等舞动特性的影响。计算结果表明,多联耐张绝缘子串较单联会增大八分裂输电线路扭转刚度,明显改变低阶固有频率,竖直与扭转振动不易发生耦合;多联耐张绝缘子串较单联对输电线路舞动特性影响大,明显改变舞动形态,增大了竖直方向舞动幅值;随风速增大输电线路舞动幅值增大;随初始风攻角不同线路舞动特征有明显变化,且与驰振稳定性计算区间相符。研究结果为输电线路舞动特性分析及防舞控制方法的研究提供了指导。

关键词:耐张绝缘子串;八分裂输电线路;扭转刚度;舞动
中图分类号:TM751 **文献标志码:**A **DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2023.05.014

Study on the galloping characteristics of eight-bundle conductor with strain insulator strings

LIU Zhuli[1], HUO Xiangyu[1], WU Chuan[2], WANG Jinyang[1], ZHANG Bo[2], LIU Guanghui[2]

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
2. Henan Key Laboratory of Power Transmission Line Galloping Prevention and Control Technology,
State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Conductor galloping has long been an important factor affecting the winter safety of transmission lines. Based on Fluent and ABAQUS, the aerodynamic coefficients of eight-bundle conductor with crescent-shaped iced are obtained to analyze the galloping stability. The conductor lines with different strain insulator strings are taken as the object to study the torsional stiffness and dynamic characteristics, and analyze the galloping characteristics like amplitude, time history of displacement and motion traces of conductors under different strain insulator string connection forms, wind speeds and initial attack angles. The results show that compared with single string, multiple strain insulator strings increase the torsional stiffness of eight split conductor lines, and change the low-order natural frequency obviously, which makes the vertical and torsional vibration coupled not easily; multiple strain insulator strings obviously change the

收稿日期:2022-03-16 **修回日期:**2022-05-10
基金项目:国家电网公司总部科技资助项目(No. 52170218000F);中国博士后科学基金资助项目(No. 2020M672238)
通信作者:伍川。E-mail:wuchuan77415@aliyun.com
引用格式:刘竹丽,霍翔宇,伍川,等. 考虑耐张绝缘子串的八分裂输电线路舞动特性研究[J]. 应用力学学报,2023,40(5):1085-1095.
LIU Zhuli, HUO Xiangyu, WU Chuan, et al. Study on the galloping characteristics of eight-bundle conductor with strain insulator strings[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(5):1085-1095.

galloping shape and increase the vertical galloping amplitude, which are great impacts on the galloping characteristics of conductor lines; the higher wind speed is, the higher galloping amplitude is; at the different initial wind attack angle, the galloping characteristics of conductor lines change obviously, which is consistent with the calculation range of galloping stability. The results provide guidance for the analysis of galloping characteristics of conductor lines and the research of anti-galloping technology.

Key words: strain insulator string; eight-bundle conductor; torsional stiffness; galloping

在冬季气象条件下,输电导线因覆冰而形成非圆截面。受水平风载作用,非圆截面导线会产生气动力,诱发低频(0.1 ~3 Hz)大振幅(导线直径的5 ~300 倍)的自激振动,即舞动[1]。而舞动发生持续时间长,振幅大,对架空输电线路的运行危害极大。舞动是一种复杂的流固耦合振动,其形成主要取决于覆冰、风激励和线路的结构与参数 3 方面的因素。特高压直流输电线路与低电压等级线路不同,常用大截面多分裂导线,迎风面子导线遮挡与尾流干扰对背风面子导线气动特性的影响较大[2]。而耐张绝缘子串联数多,重量大,导致输电线路结构参数出现较大差异。

自发现导线舞动现象以来,HARTOG[3]建立导线截面的横向驰振模型,提出垂直舞动机理。NIGOL 等[4]建立扭转驰振模型,提出扭转舞动机理。以上 2 种舞动激发机理说明系统阻尼项参数为负时,系统失稳,易发生舞动。YU 等[5]综合水平、垂直与扭转 3 个方向运动,考虑导线覆冰偏心惯性的影响,提出偏心惯性耦合失稳机理。楼文娟等[6-7]利用风洞对分裂导线模型进行舞动试验,提出三自由度耦合舞动稳定性判定方法。蔡萌琦[8]利用二维导线绕流场模型对新月形覆冰四分裂及八分裂导线气动特性进行数值模拟,并与风洞试验结果对比,验证了二维简化方法的合理性。周林抒[9]研究了不同参数对典型覆冰八分裂线路舞动特征的影响。伍川等[10-11]建立考虑导线覆冰偏心作用的舞动数值模拟方法,模拟研究了四分裂和八分裂导线在覆冰偏心作用下的舞动过程,并考虑变化的气动力研究了双分裂导线舞动特性。李清等[12]基于找形分析的有限元模型,研究了不同档距和初始张力下的扭转刚度变化规律。马伦等[13]考虑悬垂绝缘子串计算了单档输电线的等效刚度。值得注意的是,以上舞动分析中常将输电线路塔线连接方式等效为单联耐张绝缘子串或简化忽略绝缘子串结构,不能较准确地反映出实际工程中不同联数绝缘子串及其连接形式对线路动力及舞动特性的影响。

本研究首先利用 Fluent 计算得到覆冰八分裂导线的气动力系数,根据舞动机理判断易舞初始风攻角区间。利用 ABAQUS 仿真分析了不同耐张绝缘子串连接形式对八分裂线路扭转刚度、动力特性及舞动特性的影响。在此基础上,研究了风速及风向对使用六联耐张绝缘子串的八分裂线路舞动特征的影响规律。该研究结果对于覆冰八分裂导线舞动特性分析及控制方法的研究具有重要参考价值。

1 输电线路参数及舞动分析方法

1.1 输电线路参数

2018 年 1 月,昌吉-古泉 ±1 100 kV 特高压直流工程部分线路段发生舞动现象,历时约 5 h。根据现场观测可知,舞动时覆冰厚度约 10 mm,风速约4 级,风向与导线夹角约 60°。

基于《施工图设计总说明书》,该特高压直流输电线路各相为八分裂导线,导线型号为 JL1/G3A-1250/70 型钢芯铝绞线,分裂间距为 550 mm,导线设计拉断力取额定拉断力的 95%,安全系数取 2.5,年平均运行张力取设计拉断力的 23.8%。导线性能参数如表 1 所示。

表 1 JL1/G3A-1250/70 型钢芯铝绞线导线性能参数

Tab. 1 Performance parameters of JL1/G3A-1250/70 type steel core aluminum stranded wire

型号项目		参数
股数×直径/mm	钢芯	7×3.57
	铝	76×4.58
截面积/mm^2	钢芯	70.07
	铝	1 252.09
	总计	1 322.16
直径/mm		47.35
单位重量/(kg · km^{-1})		4 011.1
额定拉断力/kN		294.23
弹性模量/MPa		62 200

舞动发生段导线档距为488 m,导线两端挂点高度分别为46.5 m和81.2 m,实际弧垂为15.420 m。子间隔棒型号为FJZH8-550/1250D,重量为37.36 kg。耐张绝缘子串型号为11N63-5580-55P,实际联数为六联,结构总长度23.105 m,总重量18 705.4 kg。

按现行载荷规范中的规定,风速随高度的变化用指数公式计算,为

$$V_i = V_x (h_i/h_x)^{\alpha} \tag{1}$$

式中:h_i为换算高度;V_i为h_i对应的换算风速;V_x为高度h_x对应的实测风速;α为与气象台地面粗糙度有关的系数,空旷田野取0.16。

舞动线路段导线平均高度约为65 m,根据式(1),垂直于线路走径方向风速约为10 m/s。

1.2　舞动分析方法

输电线路舞动分析方法如图1所示。当空气流经非圆截面覆冰导线上时,各子导线受力可分解为升力F_L、阻力F_D及扭矩M共3个气动载荷。在Fluent中建立覆冰分裂导线的二维简化有限元模型,并计算导线的无量纲气动系数,包括升力系数、阻力系数及扭转系数,定义为[9]

$$C_L = \frac{F_L}{\rho U^2 Ld/2}, C_D = \frac{F_D}{\rho U^2 Ld/2}, C_M = \frac{M}{\rho U^2 Ld^2/2} \tag{2}$$

式中:ρ为空气密度;U为风速;L为导线模型的有效长度;d为子导线的直径。

覆冰导线运动过程中,风攻角α不断变化,则导线所受的气动力随攻角不断变化,可表达为[8]

$$[F_L \quad F_D \quad M]^T = \frac{1}{2}\rho Ud[C_L(\alpha) \quad C_D(\alpha) \quad dC_M(\alpha)]^T \tag{3}$$

其中覆冰导线运动过程中攻角的变化为

$$\alpha \approx \theta - \left(\frac{R\dot{\theta} + \dot{V}}{U}\right) \tag{4}$$

式中,θ、R、$\dot{\theta}$、$\dot{V}$分别为导线扭转角、特征半径、扭转角速度和竖直运动速度。

覆冰导线在运动过程中的任意时刻,所受气动载荷与当前运动状态相关。在ABAQUS中建立输电线路三维有限元模型,并定义一个质量、刚度与阻尼矩阵为零的单元[9],使其与覆冰导线单元共结点,从而获取每个计算步的结点位移、转角、速度及角速度等,计算出当前攻角条件下的气动载荷,将其加载于各导线单元。

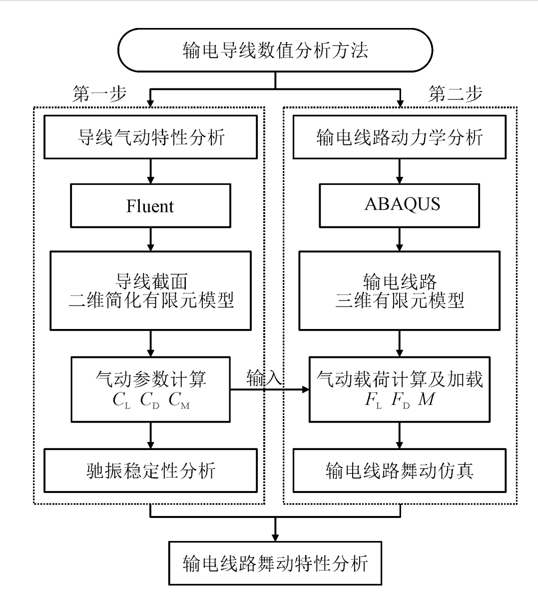


图1　输电线路舞动数值分析方法

Fig. 1　Numerical analysis of conductor galloping

2　八分裂导线气动特性分析

2.1　八分裂导线气动系数数值模拟

实际线路中覆冰非均匀分布,且其截面形状非均匀,有一定的空间随机性,特征复杂,影响因素较多,为简化计算及考察耐张绝缘子串连接型式的影响,建模时将其简化为均匀覆冰条件[9-10]。覆冰冰形以新月形考虑,初始凝冰角取0°,各子导线覆冰条件相同,并以水平正八边形结构排布。根据该特高压直流输电线路导线参数条件,建立新月形覆冰八分裂导线的二维简化有限元模型,参考文献[8]中建立的导线气动绕流场模拟方法,利用Fluent对分裂导线气动特性进行仿真分析。覆冰截面形状如图2所示。

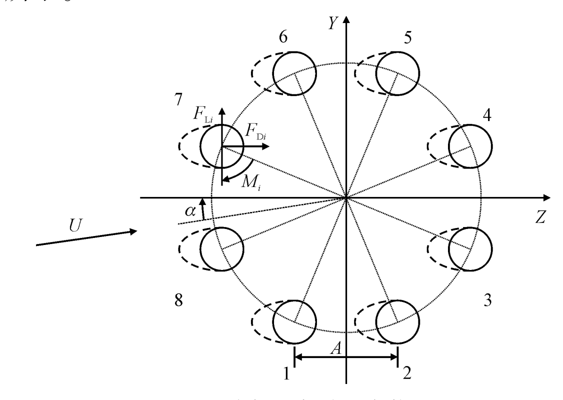


图2　覆冰八分裂导线截面

Fig. 2　Cross-section of iced eight-bundle conductor

计算域为12 m×12 m,采用结构化网格划分模型,取四边形单元,覆冰导线布种数为80,子导线直径5倍范围内扰流场网格加密,网格总数约72万,如图3所示。计算风攻角范围为0°~360°,增量为5°。保持数值模型不变,通过改变风及边界条件实现全攻角范围内导线绕流场数值模拟[14]。

根据计算结果,在气动力震荡稳定区间内取均值,绘制各子导线气动系数曲线,如图4所示。由图中曲线可知,各子导线气动系数在180°风攻角处对称变化。背风面子导线受迎风面子导线尾流的影响,存在剧烈波动。此外,8根子导线气动系数曲线变化趋势近似。

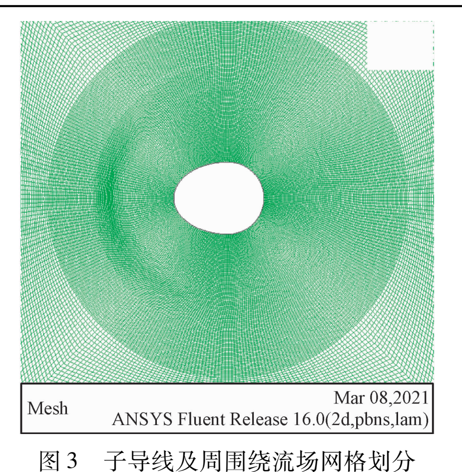


图3 子导线及周围绕流场网格划分

Fig. 3 Mesh of the sub-conductor and flow field numerical model

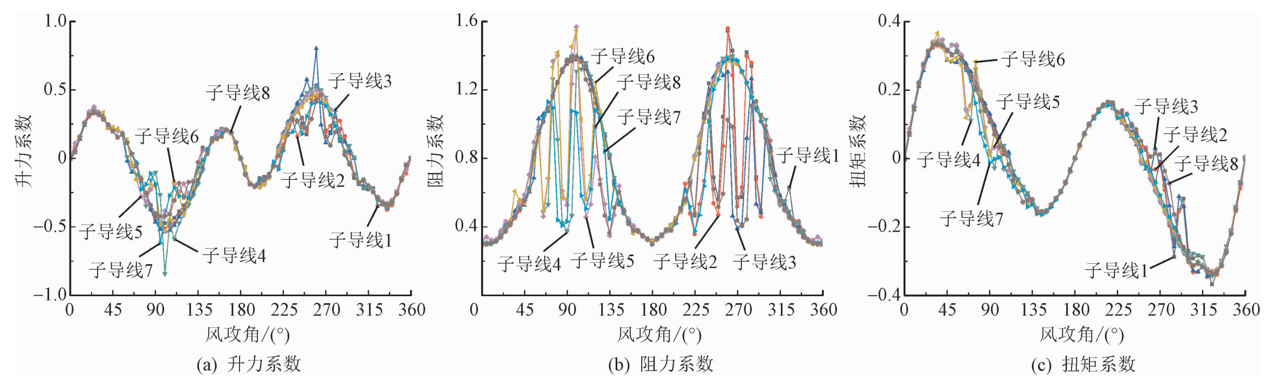


图4 气动系数随风攻角变化曲线

Fig. 4 Aerodynamic coefficient curve with attack angle

2.2 驰振稳定性分析

Den Hartog激发机理指出,当升力系数曲线斜率负值大于阻力系数时,导线横向振动系统不稳定,可能诱发垂直舞动,数学表达式为

$$Den=\frac{\partial C_{\mathrm{L}}}{\partial\alpha}+C_{\mathrm{D}}<0 \tag{5}$$

式中:*Den*为邓哈托系数;α为横向运动相对风攻角。

Nigol激发机理指出,当扭矩系数曲线斜率为负值时,导线扭转振动系统失稳,可能诱发扭转自激振动,数学表达式为

$$Ni=\frac{\partial C_{\mathrm{M}}}{\partial\alpha} \tag{6}$$

式中,*Ni*为尼格尔系数。

偏心惯性耦合失稳机理认为导线覆冰偏心引起攻角变化,导致横向运动与扭转运动相互耦合,涉及舞动过程中导线的动态响应,因此本文基于上述两种静态的舞动激发机理,对1#子导线气动系数进行稳定性分析,查找系统失稳的负值区间。邓哈托系数与尼格尔系数曲线如图5~6所示。

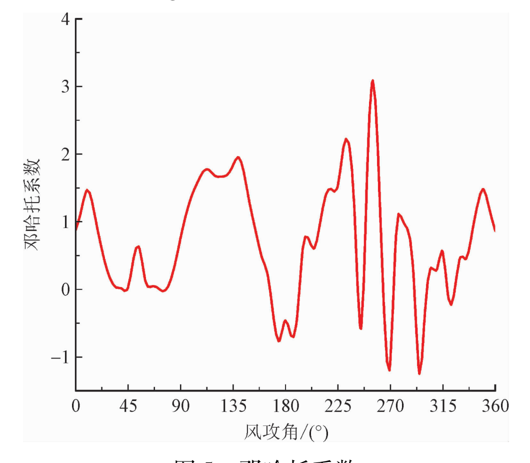


图5 邓哈托系数

Fig. 5 *Den* coefficient

可以看出,导线易激发邓哈托舞动的主要初始风攻角区间为170°~190°,并且由于导线的遮挡,阻力系数在180°~360°的区间内出现较大的波动,导致邓哈托系数在该区间内出现数次负值;易激发尼格尔舞动的初始风攻角区间为40°~145°,220°~280°,295°~325°,与邓哈托系数相似的是在180°~360°的区间内出现较大的波动。并且可见易激发尼

格尔舞动的初始风攻角区间范围大于易激发邓哈托舞动的区间。说明导线在发生舞动时，除纵向位移外，还易出现大幅扭转位移。

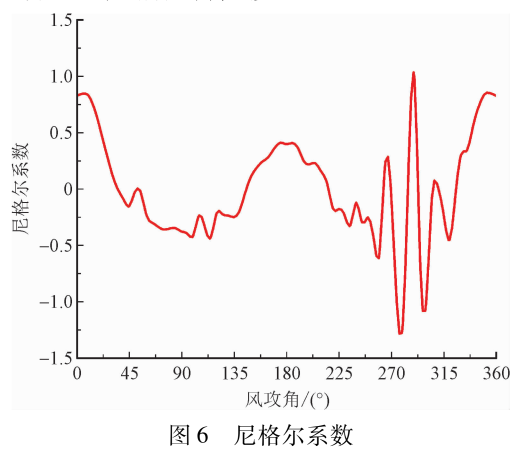


图 6　尼格尔系数

Fig. 6 *Ni* coefficient

3　耐张绝缘子串连接形式对输电线路扭转刚度及动力特性的影响

3.1　输电线路扭转刚度分析

依据该特高压直流输电线路舞动发生段的结构参数，在 ABAQUS 中建立单档覆冰八分裂输电线路有限元模型。工程中各电压等级线路使用的多联耐张绝缘子串多为单排或双排水平布置，其联数按作用于绝缘子串上的最大张力以及断联后作用于剩余完好联上的最大张力设计计算，并考虑相应安全系数[15]。为研究不同联数耐张绝缘子串及布置形式对八分裂线路扭转刚度、动力特性及舞动特性的影响，建立水平布置的双联、三联、四联耐张绝缘子串输电线路模型以及非水平布置的六联耐张绝缘子串输电线路模型。此外，为明确常用的无耐张绝缘子串模型简化方式及低电压等级线路的单联耐张绝缘子串应用于特高压输电线路的影响，建立模型进行对比分析。有耐张绝缘子串的模型中，绝缘子串整串总重量相同，各联截面尺寸相同。无耐张绝缘子串的模型去除绝缘子串结构。

输电导线作为柔索结构，呈悬链线形状，使用抛物线公式找形计算，以 Rayleigh 模型定义其阻尼，阻尼比通常取 0.02[16]。假设导线均匀覆冰，利用等效圆截面模拟覆冰导线非圆截面。释放 Euler 梁单元结点的弯曲自由度获得具有扭转自由度的索单元[9]，离散覆冰导线，导线单元长度为 0.5 m。利用梁单元建立输电线路中线夹、子间隔棒及耐张绝缘子串部件模型。

如表 2 所示，各绝缘子串按结点编号连接至图 7 中对应的线夹结点上。模型中各部件结构间以梁连接约束 2 者相对位移关系。

表 2　耐张绝缘子串连接方式

Tab. 2　Connection mode of strain insulator string

连接形式	结点编号
单联	1
双联	4、7
三联	1、4、7
四联	3、6、8、9
六联	2、3、5、6、8、9
无	无

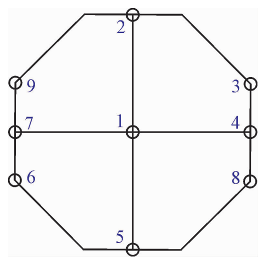


图 7　线夹结点

Fig. 7　Clamp nodes

在耐张绝缘子串两端挂点处添加固定约束，无耐张绝缘子串线路模型在八分裂导线端点处添加固定约束。线路整体施加重力载荷、初始张力，气动载荷以前文所述方式加载。六联耐张绝缘子串覆冰八分裂线路有限元模型如图 8 所示。

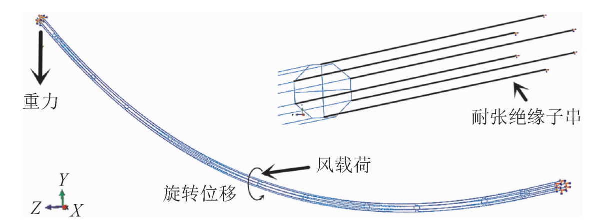


图 8　六联耐张绝缘子串输电线路有限元模型

Fig. 8　Finite element model of six insulator string conductor line

NIGOL[17]、WANG[18]和谢增等[19]建立分裂导线扭转刚度计算公式，指出分裂导线扭转刚度与线路结构参数、性能参数、塔线连接形式等有关。利用有限元仿真方法对不同耐张绝缘子串连接形式条件下的八分裂线路扭转刚度进行分析计算。在仿真过程中，对档距中点位置处施加绕分裂导线轴向旋转的位移，通过控制位移增量的大小，获得 1#子导线档距中点的扭矩-扭转角度关系曲线，如图 9 所示。

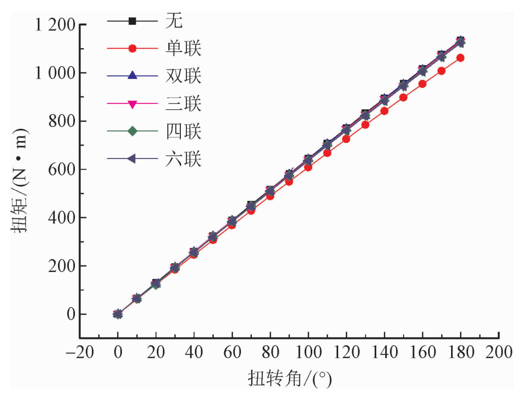


图 9　不同耐张绝缘子串输电线路扭矩-扭转角曲线

Fig. 9　Torque-torsion angle of conductors with different insulator strings

从图中可以看出,单联耐张绝缘子串输电线路模型扭转刚度明显小于多联耐张绝缘子串模型或无耐张绝缘子串模型。模型扭转刚度由大至小顺序为:①无耐张绝缘子串;②双联耐张绝缘子串;③三联耐张绝缘子串;④四联耐张绝缘子串;⑤六联耐张绝缘子串;⑥单联耐张绝缘子串。随扭转角的增加,模型扭转刚度逐渐降低。单联耐张绝缘子串模型扭转刚度从 353.68 N·m/rad 降低至337.72 N·m/rad,比例约 4.5%。双联、三联、四联、六联及无耐张绝缘子串模型扭转刚度降低比例分别约为 3.06%、2.88%、2.86%、2.53%、2.49%,相对较小。在扭转角为 180°时,不同耐张绝缘子串输电线路模型扭转刚度如表 3 所示,单联耐张绝缘子串模型扭转刚度小于其他模型 19.7 N·m/rad 以上,约 5.5%。

表 3　扭转角 180°时不同耐张绝缘子串输电线路的扭转刚度

Tab. 3　Torsional stiffness of conductors with different insulator strings at a torsion angle of 180°

连接形式	单联	双联	三联	四联	六联	无
扭转刚度/($N·m·rad^{-1}$)	337.7	360.1	359.7	358.0	357.4	360.8

可见,在输电线路运动特性计算过程中,单联耐张绝缘子串连接形式对模型扭转方向运动的约束较差,会增大其运动过程中扭转方向的位移量。在建模过程中应考虑实际线路设计中绝缘子串连接形式的影响。

3.2　输电线路动力特性分析

分裂导线的舞动特性与其动力特性相关。根据线路参数,对考虑不同耐张绝缘子串连接形式的八分裂线路在重力及初始张力作用下的模态与固有频率进行计算,得到其在竖直、水平及扭转方向的低阶动力特性,如表 4 所示。

表 4　不同耐张绝缘子串输电线路的低阶模态和固有频率

Tab. 4　Natural frequencies and modal of conductor lines with different strain insulator strings

方向	模态	固有频率/Hz					
		单联	双联	三联	四联	六联	无
竖直		0.245	0.248	0.249	0.250	0.251	
		0.250	0.252	0.252	0.253	0.253	0.283
		0.457	0.467	0.470	0.472	0.475	0.344
水平		0.141	0.142	0.142	0.143	0.143	0.142
		0.249	0.253	0.254	0.254	0.255	0.284
		0.378	0.311	0.312	0.313	0.314	0.426
扭转	单半波	0.210	0.271	0.270	0.267	0.265	0.289
	双半波	0.249	0.366	0.367	0.364	0.363	0.351
	三半波	0.384	0.468	0.490	0.464	0.475	0.479
组合	双半波		0.381	0.382	0.383	0.384	

从表中数据可见，双联、三联、四联及六联耐张绝缘子串输电线路固有频率相近，其竖直方向上单半波和双半波以及水平方向上双半波固有频率接近。故这几种线路失稳发生驰振时，可能激发竖直方向和水平方向上单双半波耦合共振。并且在 0.38 Hz 存在水平方向四半波和扭转方向双半波组合振型，如图 10 所示。单联耐张绝缘子串输电线路竖直方向上单半波和双半波以及水平和扭转方向上双半波固有频率接近，易激发 3 个方向上单双半波耦合共振。而无耐张绝缘子串输电线路竖直方向上双半波以及扭转方向上单半波固有频率接近，与其他线路模型差别较大。

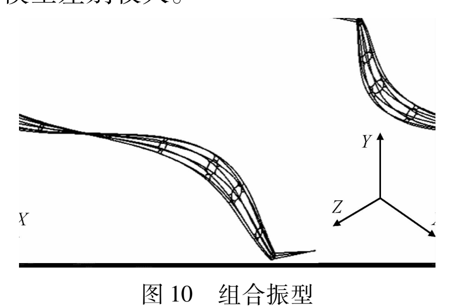


图 10　组合振型

Fig. 10　Combined modal

4　考虑耐张绝缘子串连接形式输电线路舞动特性

4.1　不同耐张绝缘子串连接形式对舞动特性的影响

从上述分析可以看出，双联至六联绝缘子串线路扭转刚度及动力特性相近，在一定程度上反映了线路的固有属性，但输电线路舞动是非线性问题。因此利用建立的有限元模型和数值计算得到的气动系数，根据上述舞动模拟方法，在 10 m/s 风速及 180°初始风攻角条件下，对考虑不同耐张绝缘子串连接形式的覆冰八分裂线路进行舞动特性分析。

图 11 和图 12 分别给出 6 种线路模型 1#子导线在档距 1/4 结点处及中点处的竖直方向、水平方向及扭转方向舞动幅值变化曲线，图中曲线包含舞动幅值的最大值、最小值以及 RMS 均方根值。由图中 RMS 曲线可以看出，双联至六联耐张绝缘子串输电线路在档距 1/4 结点与中点处竖直方向的舞动幅值均大于单联及无耐张绝缘子串输电线路，而水平方向的舞动幅值明显小于后两者。此外，在档距 1/4 结点处，前者扭转方向的舞动幅值明显小于后两者；而在档距中点处，有耐张绝缘子串输电线路的扭转方向舞动幅值明显小于无耐张绝缘子串输电线路。多联耐张绝缘子串与无耐张绝缘子串输电线路扭转刚度接近，但其固有频率相差较大，致使模型受相同风载激励后，出现不同的运动响应特征。由此可以看出，无耐张绝缘子串输电线路舞动形态以竖直方向双半波、水平方向双半波以及扭转方向单半波组合运动为主，舞动峰值频率均为 0.288 Hz。单联耐张绝缘子串输电线路舞动形态以竖直方向和扭转方向的双半波组合运动为主，舞动峰值频率分别为 0.25 Hz 和 0.246 Hz，并且其竖直与扭转方向舞动幅值最大值与最小值的差值较大，舞动时程的稳定性较差。而双联至六联耐张绝缘子串输电线路舞动形态以竖直方向单半波运动为主，舞动峰值频率为 0.242 Hz，符合邓哈托舞动的形态特征以及气动特性驰振稳定性理论分析，间接证明有限元分析模型的正确性。

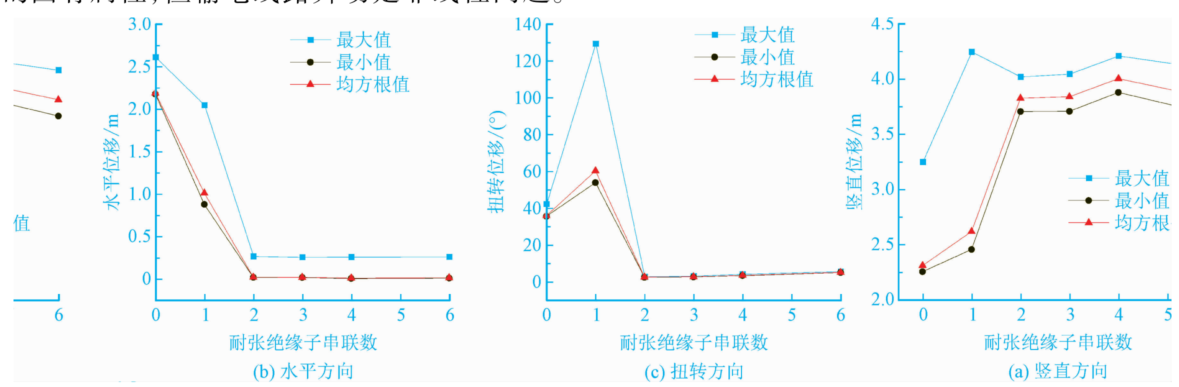


图 11　不同数量绝缘子串覆冰线路 1/4 处舞动幅值

Fig. 11　Galloping amplitude of iced conductor lines with different insulator strings (quarter-point)

以无耐张绝缘子串、单联耐张绝缘子串及六联耐张绝缘子串输电线路舞动时程及运动轨迹为例，如图 13 所示。图 13(a)、图 13(b) 及图 13(c) 分别为 1#子导线中点处竖直方向、水平方向和扭转方向

的位移时程曲线，其中六联耐张绝缘子串输电线路舞动时程波动稳定，而单联耐张绝缘子串输电线路舞动时程曲线包络线变化较大。并且，由图 13(d)所示的运动轨迹可以看出，随着绝缘子串联数增加，导线运动轨迹从水平椭圆、倾斜椭圆变为竖直椭圆。

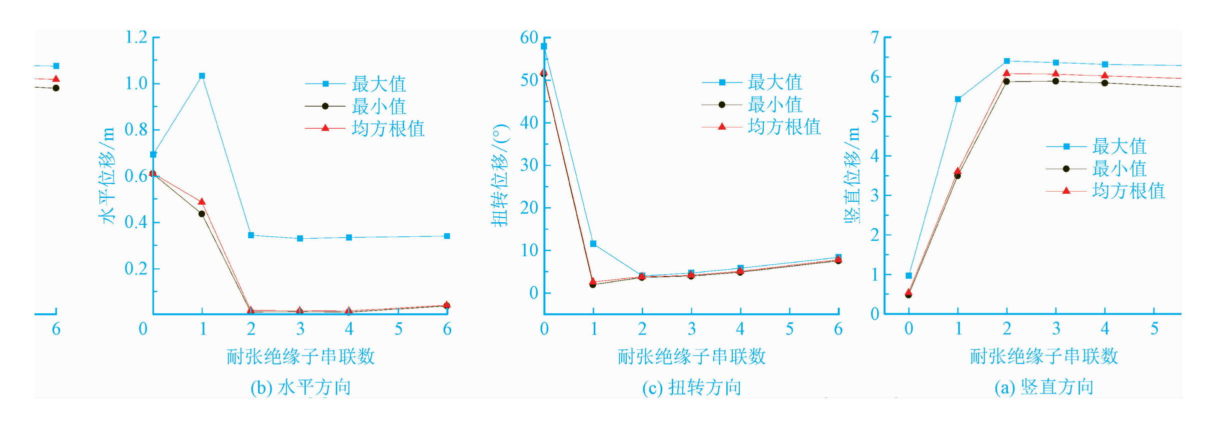


图 12 不同数量绝缘子串覆冰线路中点处舞动幅值

Fig. 12 Galloping amplitude of iced conductor lines with different insulator strings (midpoint)

图 13 不同耐张绝缘子串输电线路中点处位移时程及运动轨迹

Fig. 13 Time histories of displacement and motion traces of conductor lines with different insulator strings (midpoint)

4.2 风速对舞动特性的影响

从上述分析可以看出，双联至六联耐张绝缘子串输电线路舞动特性相近。文献[20]指出，舞动发生频次与风速成正态分布关系，大致在 4 ~ 25 m/s 范围内，对应风力等级 3 ~ 9 级。故选择 3 ~ 9 级风速下限值 4、6、8、10、14、17、20 m/s 风速，180°初始风攻角作为输入参数，以六联耐张绝缘子串为基础，对线路舞动进行分析。

图 14 分别给出不同风速条件下 1#子导线档距

中点处的竖直、水平及扭转方向舞动幅值变化曲线。从图 14 可以看出，覆冰导线在 6 m/s 风速条件下开始出现明显舞动现象，竖直方向舞幅为 2.03 m，且随风速的增大，系统输入能量增长，竖直方向最大幅值呈线性增长趋势。在 4 ~ 10 m/s 风速区间内，导线竖直方向舞幅最大值与最小值相差较小，RMS 均方根值增长稳定，舞动峰值频率为 0.242 Hz，水平及扭转方向未发生明显舞动现象。当风速达到 14 m/s 时，舞幅最大最小值差值增大，导线舞动时程不稳定，激发水平及扭转方向的运动，使系统内能量从竖直方向运动向水平及扭转方向运动转移，竖直方向舞动峰值频率为 0.254 Hz。而当风速为 20 m/s 时，竖直方向舞动峰值频率达到 0.458 Hz，舞动形态发生明显转变。

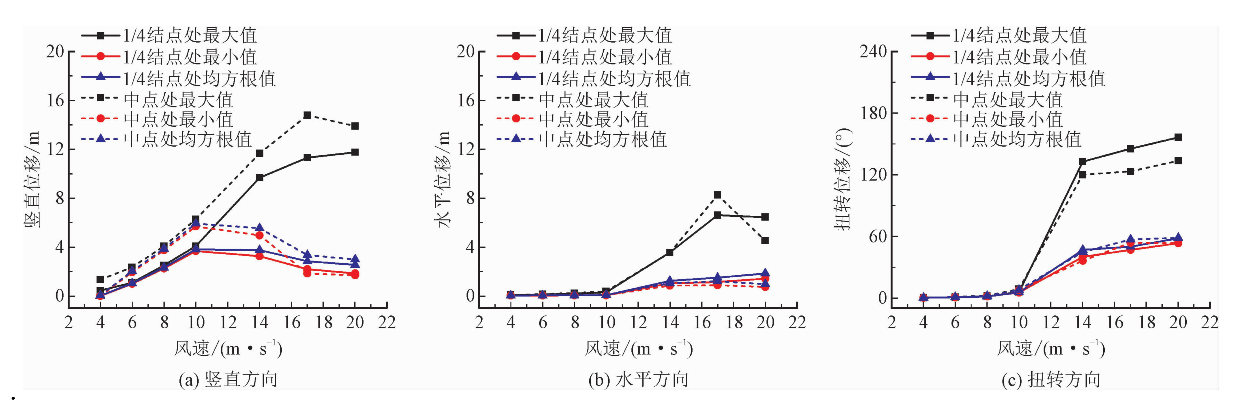


图 14　不同风速下覆冰线路舞动幅值

Fig. 14　Galloping amplitude of iced conductor under different wind speeds

4.3　初始风攻角对舞动特性的影响

根据输电线路驰振稳定性分析可知，不同初始风攻角条件会激发对应不同舞动机理的形态特征。在 0° ~ 180° 初始风攻角区间内，以 10° 为间隔，研究六联耐张绝缘子串输电线路在 8 m/s 风速条件下的舞动特性。

计算结果显示，在测试的初始风攻角区间内，输电线路的位移时程出现明显振荡的初始风攻角有 0°、60°、70°、120°、140°、180°。图 15 给出几种初始风攻角条件下覆冰线路档距 1/4 结点及中点处的 RMS 幅值。可以看出，在这几个初始风攻角中，输电线路在 0°与 120°时均未形成舞动。此外，180°初始风攻角扭转方向的舞动幅值明显小于其余 3 个初始风攻角的幅值，其中点处的幅值仅为 1.8°，而竖直方向的舞动幅值远大于后者，达 3.87 m。部分初始风攻角条件下档距中点处的位移时程如图 16 所示。输电线路在 180°初始风攻角条件下，仅发生竖直方向舞动。其余条件下，在发生竖直方向舞动时，伴随剧烈的扭转方向舞动，符合驰振稳定性计算区间。并且，对比单联及无耐张绝缘子串输电线路的舞动特性，多联耐张绝缘子串连接形式可为输电线路提供更加有效的扭转方向位移约束条件，使输电线路在不同舞动激发条件下的运动特征更加明显。

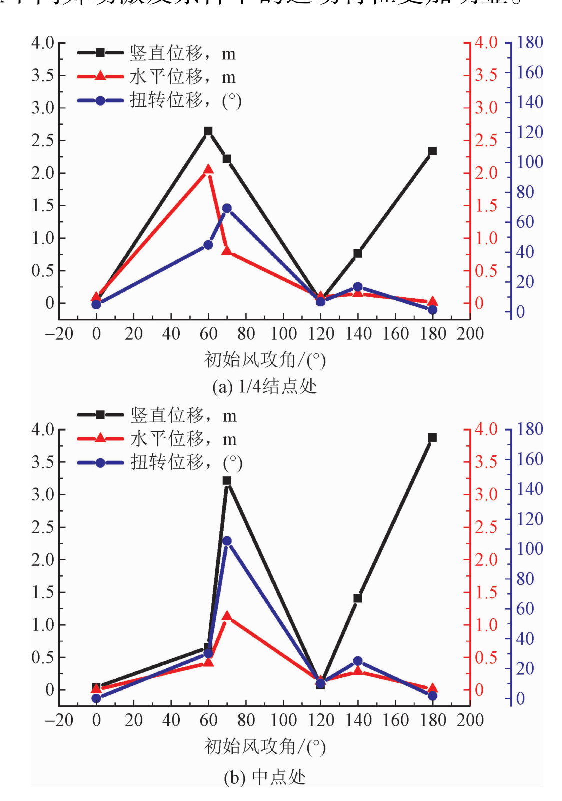


图 15　不同初始风攻角下覆冰线路舞动幅值（RMS）

Fig. 15　Galloping amplitude of iced conductor lines under different initial attack angles (RMS)

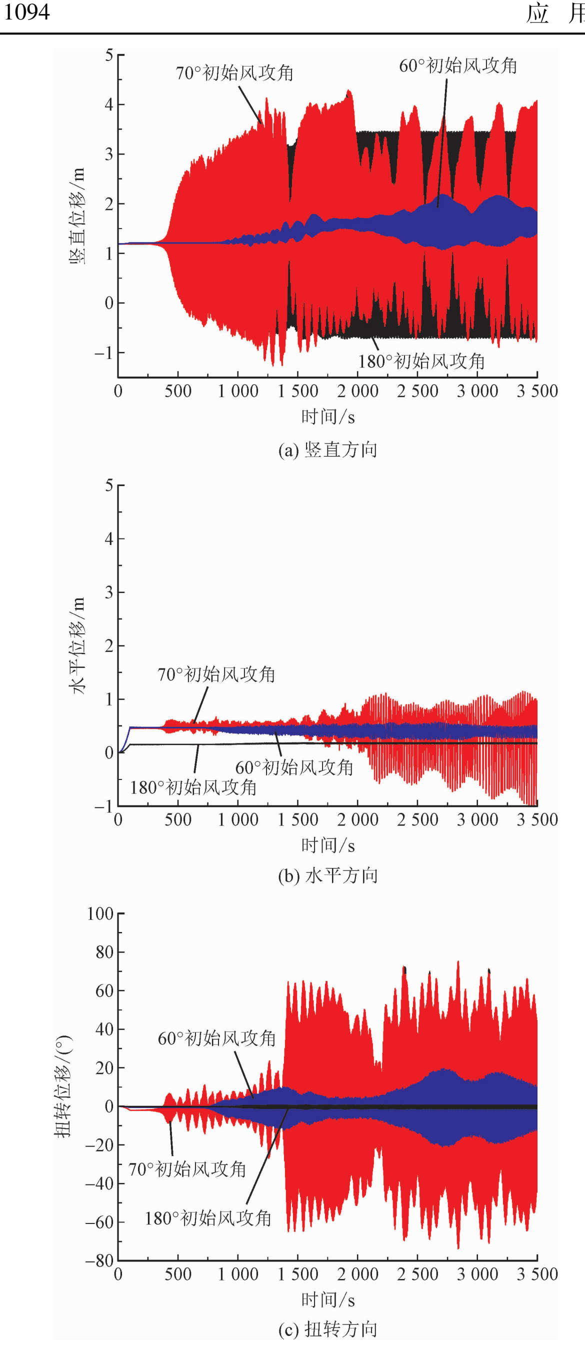


图16 不同初始风攻角下覆冰线路中点处位移时程

Fig. 16 Time histories of displacement of iced conductor lines under different initial attack angles (midpoint)

5 结 论

本研究利用 ABAQUS 软件建立了不同结构参数条件下覆冰八分裂输电线路有限元模型,并结合舞动机理、气动参数及扭转刚度计算,仿真分析了耐张绝缘子串连接形式、风速及风向对输电线路舞动特性的影响,主要获得以下结论。

1)多联耐张绝缘子串输电线路扭转刚度相较于单联耐张绝缘子增大5.5%以上,提供较大的扭转方向位移约束,且随耐张绝缘子串联数增加,输电线路扭转刚度逐渐降低。

2)单联及无耐张绝缘子串输电线路固有频率在竖直、水平与扭转方向的单双半波相差较小,易发生低阶耦合振动。

3)多联耐张绝缘子串输电线路舞动时程较为稳定,与初始风攻角对应的邓哈托舞动特征更加明显,以竖直方向舞动为主,舞动幅值较大。单联与无耐张绝缘子串输电线路舞动易与扭转方向发生耦合,运动过程复杂。

4)风速条件对六联耐张绝缘子输电线路舞动时程稳定性影响较大。10 m/s 及以下风速条件下舞动幅值线性增长,风速增大舞动过程不稳定,舞动特征发生改变。

5)六联耐张绝缘子串输电线路舞动特征随初始风攻角不同,与邓哈托及尼格尔舞动稳定性区间对应。驰振稳定性分析可为多联耐张绝缘子串输电线路舞动模式提供初步判断与参考。

多联耐张绝缘子串对输电线路舞动时程、舞动形态及幅值影响较大,输电线路分析中应考虑实际线路中耐张绝缘子串连接形式的影响。

参考文献:

[1] 郭应龙,李国兴,尤传永. 输电线路舞动[M]. 北京:中国电力出版社,2003.

[2] 陈元坤. 分裂导线的微风振动与次档距振荡研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.

[3] HARTOG J P D. Transmission line vibration due to sleet[J]. Transactions of the american institute of electrical engineers,1932,51(4):1074-1076.

[4] NIGOL O, BUCHAN P G. Conductor galloping-part Ⅱ torsional mechanism[J]. IEEE transactions on power apparatus and systems,1981,PAS-100(2):708-720.

[5] YU P, POPPLEWELL N, SHAH A H. Instability trends of inertially coupled galloping:Part Ⅱ:Periodic vibrations[J]. Journal of sound and vibration,1995,183(4):679-691.

[6] 楼文娟,余江,姜雄,等. 覆冰导线三自由度耦合舞动稳定性判定及气动阻尼研究[J]. 土木工程学报,2017,50(2):55-64.
LOU Wenjuan, YU Jiang, JIANG Xiong, et al. Stability evaluation and aerodynamic damping study on three-degree-of-freedom coupled galloping of iced conductors[J]. China civil engineering journal,2017,50(2):55-64(in Chinese).

[7] 楼文娟,余江,姜雄,等. 覆冰六分裂导线舞动风洞试验及起舞风速研究[J]. 振动工程学报,2017,30(2):280-289.
LOU Wenjuan, YU Jiang, JIANG Xiong, et al. Wind tunnel test and critical wind speed study for galloping of 6-bundled iced conductors

[J]. Journal of vibration engineering, 2017, 30(2): 280-289(in Chinese).
[8] 蔡萌琦. 分裂导线气动特性及次档距振动研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
[9] 周林抒. 覆冰分裂导线舞动数值模拟及参数分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
[10] 伍川. 输电线路脱冰跳跃及驰振特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
[11] 伍川, 严波, 张博, 等. 变化的气动力和电磁力对覆冰双分裂导线舞动的影响[J]. 应用力学学报, 2019, 36(2): 364-371, 507.
WU Chuan, YAN Bo, ZHANG Bo, et al. Effects of varying aerodynamic and electromagnetic forces on galloping of iced twin bundle conductor lines[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2019, 36(2): 364-371, 507(in Chinese).
[12] 李清, 马伦, 解健, 等. 大档距多分裂输电导线扭转刚度计算分析[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 158-162.
LI Qing, MA Lun, XIE Jian, et al. Calculation and analysis on torsional stiffness of large-span multi-conductor bundle[J]. High voltage apparatus, 2020, 56(2): 158-162(in Chinese).
[13] 马伦, 张博, 伍川, 等. 输电线等效刚度计算方法及舞动分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 2094-2104.
MA Lun, ZHANG Bo, WU Chuan, et al. Calculation method for equivalent stiffness of transmission lines and analysis of galloping[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(5): 2094-2104(in Chinese).
[14] CAI M Q, YAN B, LU X, et al. Numerical simulation of aerodynamic coefficients of iced-quad bundle conductors[J]. IEEE transactions on power delivery, 2015, 30(4): 1669-1676.
[15] 张殿生, 国家电力公司东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2003.
[16] 刘贝贝. 基于数值模拟方法的覆冰四分裂导线舞动特性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
[17] NIGOL O, CLARKE G J, HAVARD D G. Torsional stability of bundle conductors[J]. IEEE transactions on power apparatus and systems, 1977, 96(5): 1666-1674.
[18] WANG J W, LILIEN J L. A new theory for torsional stiffness of multi-span bundle overhead transmission lines[J]. IEEE transactions on power delivery, 1998, 13(4): 1405-1411.
[19] 谢增, 刘吉轩, 刘超群, 等. 架空输电线路分裂导线扭转刚度计算新方法[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(2): 100-105, 140.
XIE Zeng, LIU Jixuan, LIU Chaoqun, et al. New calculating algorithm for torsional stiffness of bundle overhead transmission lines[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(2): 100-105, 140(in Chinese).
[20] 张立春, 朱宽军. 输电线路覆冰舞动灾害规律研究[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(9): 13-19.
ZHANG Lichun, ZHU Kuanjun. Research on the law of disasters caused by transmission line galloping[J]. Power system and clean energy, 2012, 28(9): 13-19(in Chinese).

（编辑　史淑英）